

文章编号: 1000-7598-(2008)11-2912-07

竖向荷载作用下桩筏基础可视化模型试验研究

郑 刚¹, 裴颖洁^{1,2}, 刘双菊¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 上海岩土勘察设计院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 进行了群桩基础可视化模型试验。在试验过程中对各级竖向荷载作用下群桩基础桩、土的变形采用高清晰数码相机拍摄了照片。通过对照片进行后处理分析, 得到了桩、土的位移场, 也对桩身轴力也进行了量测, 在该基础上研究了群桩基础的变形性状和破坏模式, 重点分析对比了桩间距和桩长对桩端土体沉降以及桩身侧摩阻力的影响。试验发现, 桩距是影响桩土相对滑移量的主要因素, 桩距越大, 桩身与土的相对滑移量就越大, 桩端刺入量也越大。在柔性筏基下, 随桩距增加中桩的桩土相对滑移量可能会大于边桩。桩端刺入量是大桩距桩基础主要的沉降构成, 以桩端刺入量为研究对象建立一套大桩距基础新的沉降计算理论, 似乎值得进一步研究。桩顶向上刺入(可通过设置褥垫层、桩顶预留净空或设置可压缩垫块来实现)有利于桩间土的压密, 减小桩端刺入量, 甚至改变破坏模式。

关 键 词: 桩筏基础; 可视化模型试验; 位移场; 侧摩阻力

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Visual experimental study of piled raft under vertical loading

ZHENG Gang¹, PEI Ying-jie^{1,2}, LIU Shuang-ju¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., LTD. Shanghai 200092, China)

Abstract: Model tests of piled raft are performed, the high quality digital pictures of displacements of soil and piled raft under each vertical load increment are taken during testing process. The axial forces of piles are measured. The detailed displacement fields of soil and piles are obtained by analyzing the digital pictures. Based on this, the failure mode and deformation behavior of the piled raft are studied. The effect of pile spacing and pile length on the settlement beneath pile tip and shaft resistance of pile is analyzed. Test results show that pile spacing is the major factor which has significant effect on the slip at the interface of pile shaft and surrounding soil. The piled foundation with bigger pile spacing produces larger pile – soil slip and pile tip penetration. The central pile under comparatively flexible raft can produce larger pile – soil slip and pile tip penetration than that of edge piles when pile spacing is large enough. The pile tip penetration accounts for most part of the settlement of piled raft with larger pile spacing. This implies that it's necessary to construct a theory, where the pile tip penetration should be taken into account, to calculate the settlement of piled raft with large pile spacing. By laying a layer of sand cushion, compressible block, or simply a gap between raft and pile head to make it possible for the soil beneath raft to carry load first, the soil beneath the raft can be compacted before piles begin to carry load significantly and thus can reduce the pile-soil slip and pile tip penetration and even change the failure mode.

Key words: piled raft; visual model test; displacement field; shaft resistance

1 引 言

群桩基础受竖向荷载的作用时承台、基桩和土形成一个相互作用、相互影响的工作体系, 其工作性状和破坏特征明显区别于单桩。影响群桩作用的因素很多, 有桩距、桩长、土体强度、基础刚度等, 其中桩距和桩长对群桩基础的影响作用较为

明显, 特别是桩距的变化会改变基础的破坏模式, 影响桩身受力性状和桩土位移场分布^[1]。

国内外学者对群桩理论做了大量的工作, 根据现场试验和模型试验, 研究了群桩的破坏模式、工作性状以及桩土相互作用机制等多方面内容, 但由于试验条件和手段等多方面因素的限制, 很难直接观察桩基破坏模式和变形过程, 此外桩间土体和桩

收稿日期: 2007-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50678115); 天津市前沿应用基础研究计划重点项目 (No.07JCZDJC09800)。

作者简介: 郑刚, 男, 1967年生, 博士, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与研究工作。E-mail: zhengzige2004@yahoo.com.cn

端以下土体的位移场究竟如何分布也很难得到。本次的群桩基础模型的可视化试验采用的主要方法是：以基于数字照相和图像处理的变形量测法^[2-3]为原理，在基础受力过程中对观测表面进行拍照，然后利用相应的图像后处理软件进行分析，进而得到群桩观测表面上的桩土位移场分布，并结合应变仪等其他试验设备的测量结果，讨论了桩距、桩长等因素的变化对承受竖向荷载的群桩基础的破坏模式和变形性状的影响。

2 试验方案

2.1 试验材料及设备

群桩基础的可视化模型试验在尺寸（长×宽×高）为 1.2 m×0.8 m×1.5 m 的钢箱内进行。为了便于试验拍照和观测，钢箱的一个侧面用厚度 $t=3$ cm 的钢化玻璃取代钢板。加载装置利用杠杆原理采用砝码进行加载，试验装置如图 1 照片所示。模型桩基是以某工程实际 9 桩基础为原型，取几何相似系数 $C_L=1/20$ 考虑设计的，为能够观测到桩基的变形情况，按照轴对称结构取 1/2 模型为试验模型桩基，如图 2 所示。

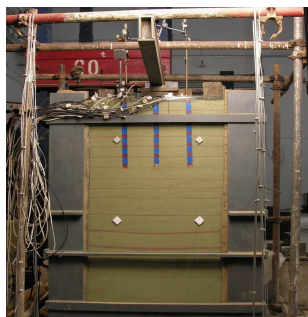


图 1 加载装置照片

Fig.1 The picture of loading device

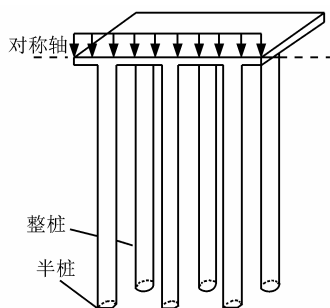


图 2 群桩模型示意图

Fig.2 Sketch map of the group of piles model

群桩基础模型由有机玻璃板及有机玻璃管组成，承台板厚 2 cm，承台尺寸及桩身位置如图 3 所示。桩身管径 $D=3$ cm，壁厚 $t=5$ mm，在桩端处

管口封底。有机玻璃的弹性模量 $E=3.7$ GPa，泊松比 $\nu=0.25$ 。试验用土采用细河砂，土样参数见表 1。采用的试验设备包括 YJ-35 电子应变仪、机电式百分表、SZY-3-B 微型压力传感器、CP8400 数码照相机、摄影灯等。

表 1 土样物理性质

Table 1 The physical properties of the soil

含水率 $\omega/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	比重 G	孔隙比 e	相对 密实度 D_r	压缩 系数 a $/MPa^{-1}$	压缩 模量 E_s $/MPa$	内摩 擦角 φ $/(^{\circ})$
0.25	1.60	2.64	0.654	0.52	0.06	27.57	34.7

2.2 试验内容

按照变桩长和变桩距的不同情况本次试验共分 4 个工况，分别为 3D40 试验（桩长 $L=40$ cm，桩间距 $S=3D$ ， D 为桩径。其余类推）、3D60 试验、6D40 试验和 6D60 试验。每个试验工况分为 2 组，桩径 D 均为 3 cm。从桩顶至桩端沿桩身在管壁内侧均匀粘贴 6 枚应变片来测量基桩内表面应变的变化，从而得出桩身轴力和侧摩阻力随荷载增加产生的变化。由图 1 可知，依靠数码相机只能拍摄到观测面后的半桩及其附近土体的受力变形情况，而半桩后的土体以及整桩位移是无法拍摄分析到的，在桩端附近距桩中心 3 cm 处（即桩表面外 1.5 cm，见图 3）埋设微型位移标来测量该处土体的沉降，其量值由伸出土面的位移标顶部的机电百分表量测。模型试验采用杠杆系统利用砝码进行分级加载，每级荷载 80 kg 共 9 级。为了得到稳定真实的测试数据和高质量的数码照片，每级荷载施加完毕后持荷 10 min 再进行数据采集和相片拍摄。

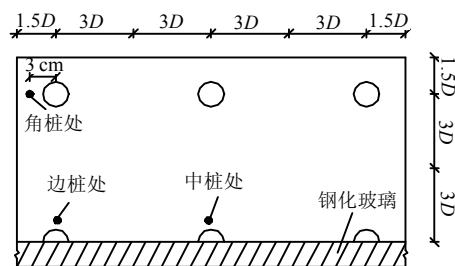


图 3 桩端平面处沉降测点示意图

Fig.3 Layout of cap and piles and location of settlement measurement at pile tip level

可视化试验是基于图像分析的位移量测法，采用数码相机在各个加载阶段对桩基模型进行拍摄，然后对照片序列进行图像相关分析，从而得出群桩基础模型变形场分布和其他测量数据。试验时，将模型的半桩一侧紧贴在钢化玻璃上，分层填土至承

台下。为了突出试验的直观效果,从承台下沿到桩端下部范围内的土体铺染色砂层。染色层间距为 10 cm,靠近桩端附近处的间距为 5 cm 或 10 cm。半桩表面粘贴彩色塑料薄膜,并按一定间距粘贴彩色带,以显示桩基受力变形后桩土之间的相对位移变化情况,某一级加载下的情况如图 4 所示。需要说明的是,为了确保箱内填土的均匀性,每次夯填均取固定体积的砂土由固定人员在试验箱内将砂土均匀夯至恒定厚度。



图 4 某级荷载下桩端附近桩土位移

Fig.4 Settlement of pile and soil under vertical loading

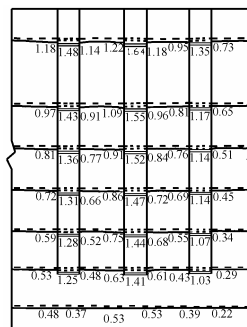
3 试验分析

在每级荷载作用下群桩基础模型及周围土体变形的照片借助同济大学的图像分析软件进行处理后,并通过 PostViewer 后处理软件得到每级荷载下 3 根半桩(即 9 桩基础中的中间一排桩)及其周围土体的变形云图,可见观测面上任一点桩、土的位移变化,并整理成图 5 的形式,便于考察桩土相对位移情况,而桩身轴力及侧摩阻力则通过应变仪测量得到的桩身应变值得出。

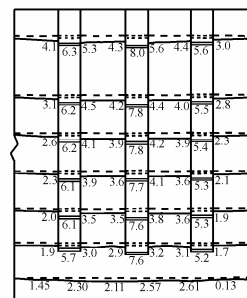
3.1 桩距对群桩基础破坏模式的影响

相对于桩长而言,桩距对群桩基础破坏模式的影响更为显著。限于篇幅,本文仅就桩距的影响因素展开讨论。图 5(a)~5(f)给出了 3D60 与 6D60 试验群桩分别在第 1 级、第 4 级和第 9 级荷载作用下观测面上染色砂带同与其相邻处桩身的位移变化,其中虚线为加载前染色砂带与桩身的位置,实线表示加载完毕后染色砂带与桩身的位置。从图中可以看出,在加载受荷过程中 3D60 试验桩土绝对沉降较大,而相对滑移不明显,相对于 3D60 和 6D60 群桩基础发生明显的刺入破坏,桩间土位移较小,桩土之间产生显著的相对滑移,桩身对桩间土体产生的下曳效果不明显,因而桩距的改变会

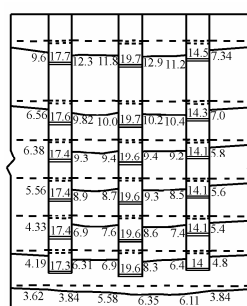
引起桩基破坏模式发生变化。桩距增大,使群桩基础整体破坏的趋势减弱,直至各桩均发生刺入。



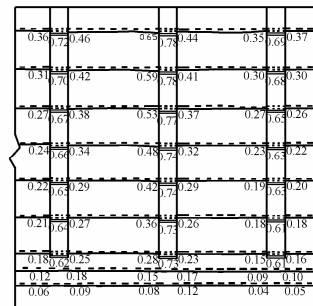
(a) 3D60 试验第 1 级荷载



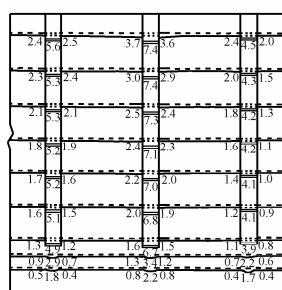
(b) 3D60 试验第 4 级荷载



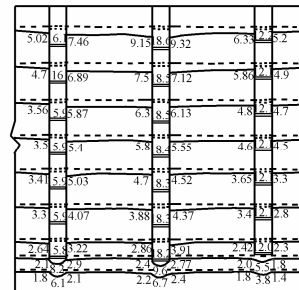
(c) 3D60 试验第 9 级荷载



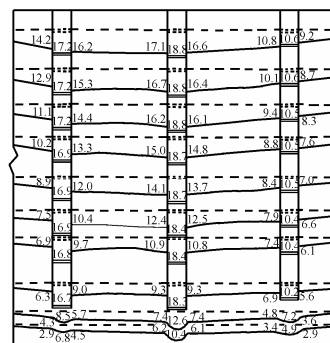
(d) 6D60 试验第 1 级荷载



(e) 6D60 试验第 4 级荷载



(f) 6D60 试验第 9 级荷载



(g) 刚性桩复合地基试验第 9 级荷载

图 5 试验加载后染色砂条及相邻处桩身位移变化(单位: mm)

Fig.5 The displacement variance of dyeing strip and adjacent piles (unit: mm)

为了进一步对比研究群桩基础型式对破坏模式的影响, 本次试验在 6D60 群桩桩顶预留 5 mm 的间隙, 并以海绵填充其间以模拟刚性桩复合地基的褥垫层结构。在相同的荷载作用下海绵的存在使得桩间土先于桩身发生沉降并承担一定荷载, 在桩顶向海绵刺入变形的同时, 随着荷载的逐级施加, 桩土共同分担上部荷载。由于桩顶向海绵的刺入降低了群桩基础的桩端刺入量, 桩间土体得到进一步压实, 基础的破坏整体性加强。图 5 (g) 为刚性桩复合地基在加载完毕后的染色砂层及桩身的位移变化, 可见基础的桩端刺入明显降低。

3.2 桩距对群桩基础桩土相互作用以及沉降计算模式的影响

从图 5 中可以看出, 桩间距较小时, 群桩基础中的基桩桩身大部与桩间土体的相对位移量较小, 除桩端处发生少量刺入外, 基桩带动桩间土一起向下整体位移, 此时桩与桩间土形成一个实体墩基, 且桩间土压缩量不显著, 按照 Boussinesq 解确定土体附加应力的等代实体墩基法计算的群桩沉降结果较为可靠。但当桩间距 $S \geq 6D$ 时, 群桩中的桩间土压缩变形增大, 是群桩沉降的主要部分, 桩身呈刺入破坏, 且桩端处刺入量明显, 桩与桩间土之间的相对位移量较大, 随着荷载的增加桩间土并未随基桩同时发生向下的位移。对于大桩距的疏桩基础而言, 《建筑桩基技术规范》^[4] 推荐的以 Mindlin 解来确定土体附加应力的等代实体墩基法计算群桩沉降中, 桩基等效沉降系数 ψ 从一定程度上反映了桩长、桩距等因素对按实体基础计算沉降的影响, 但由于桩间土的压缩变形随桩身位置而变化的非线性以及桩土相互作用机制的复杂性等原因, 特别是桩端刺入量的问题, 大桩距的疏桩基础沉降计算有待于进一步完善, 因此有些学者采用半解析半数值的非线性分析方法^[5]来解决复合桩基的桩土共同作用问题, 但由于其计算的复杂性, 在普通的工程设计领域里有一定的推广难度。

3.3 桩距、桩长对基桩侧摩阻力的影响

试验研究发现, 桩间距 S 的改变对侧摩阻力大小及其沿桩身分布的影响更加明显。限于篇幅, 仅以桩长 $L=40$ cm 的桩型为例。图 6 为 3D40 和 6D40 试验中的边桩在每级荷载作用下侧摩阻力沿桩身的分布情况, 该实测侧摩阻力分布与一般足尺试验结果相似, 测试结果可靠。从图 6 中亦看出, 当桩长相同时常规桩基础 ($S=3D$) 的边桩侧摩阻力要小于疏桩基础 ($S=6D$)。疏桩基础的侧摩阻力呈 R 型分布, 其承台底土反力对桩身上部侧摩阻

力有显著的加强作用; 当桩距 $S=3D$ 时, 桩身上部桩土整体下沉, 几乎看不出有任何加强作用。同时研究发现, 每组桩型的基桩侧摩阻力均是角桩最小, 边桩次之, 中桩最大。以 3D60 和 6D60 试验的对比为例, 当最大量级荷载施加完毕基础达到极限状态后 2 种型式的基桩侧摩阻力如图 7 所示。

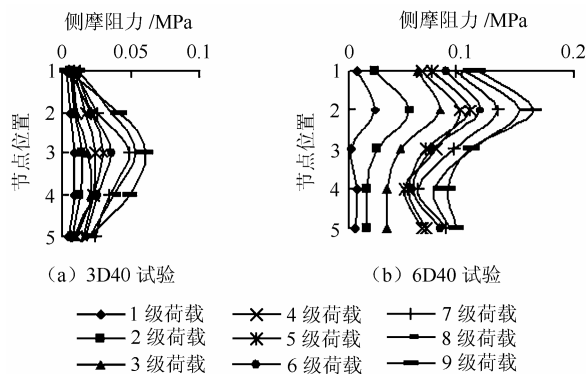


图 6 边桩侧摩阻力分布

Fig.6 Distributing of the side pile's shaft resistance

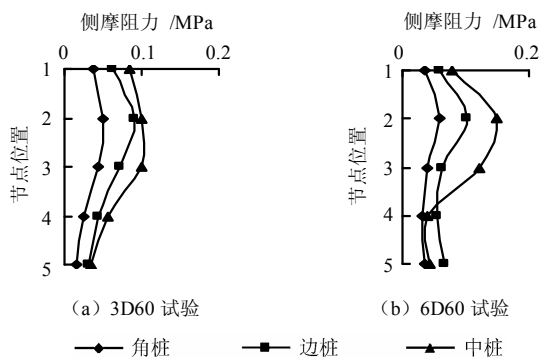


图 7 加载完毕后各桩侧摩阻力的比较

Fig.7 The comparison of piles' shaft resistance after loading

根据后处理软件 PostViewer 可得到每级荷载作用下的桩端沉降。图 8 为 4 组模型试验中桩的平均侧阻和沉降之间关系的对比。从图中明显可以看出, 达到相同沉降时 6D60 试验的桩身提供的侧摩

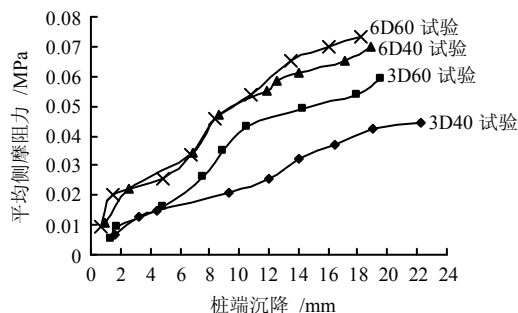


图 8 平均侧阻-沉降

Fig.8 The mean shaft resistance-settlement

阻力最大, 3D40 试验的侧摩阻力最小, 这进一步表明了桩距是决定侧摩阻力发挥程度的一个重要因素。桩间距的增大减少了桩身对土体的遮拦、下曳作用, 有利于桩身侧摩阻力的提高。从图 8 中也可以看出, 对于桩距相同的桩型 (6D60 与 6D40、3D60 与 3D40) 当达到相同的沉降时, 较长的桩身可以提供较大的平均侧阻。

3.4 桩距、桩长对桩端土体位移的影响

利用照片后处理软件以及位移标测量结果可以得到桩端平面上距离桩中心 3 cm 处土体的沉降, 沉降观测点位置如图 3 所示。图 9 分别为 4 组试验在桩端平面处的土体沉降对比。可以看出, 6D60 试验的 3 个测点处土体沉降最小, 6D40 和 3D60 试验的次之, 3D40 的最大, 同时每组试验均是中桩附近土体沉降最大, 边桩处次之, 角桩处最小。

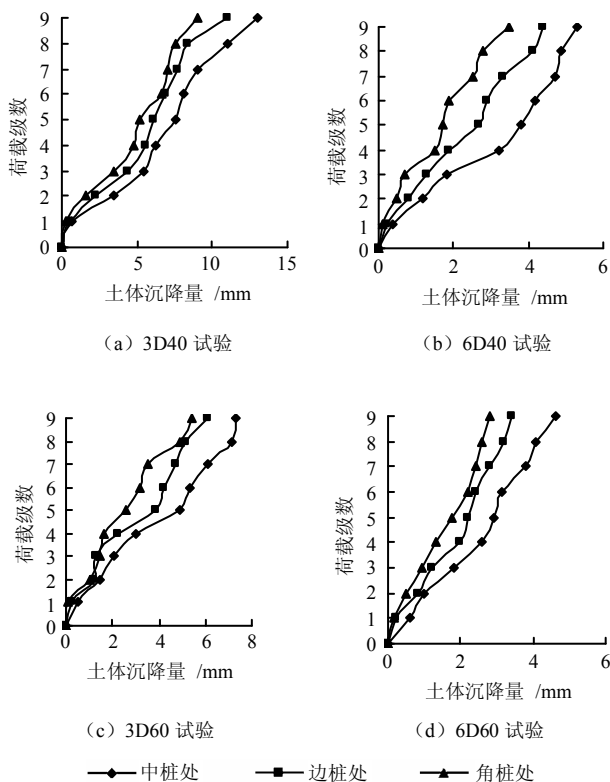


图 9 桩端平面处的土体沉降

Fig.9 The settlement of soils on the plane of pile tip

3.5 桩距、桩长对桩端刺入量的影响

图 10 分别为 4 组试验的半桩处桩端刺入量对比。可以看出, 随着荷载级数的增加, 3D 桩与 6D 桩型的中桩桩端刺入量都大于左右两边桩的刺入量。不同的是, 6D 桩型的中桩与边桩刺入量的差值大于 3D 桩型的。

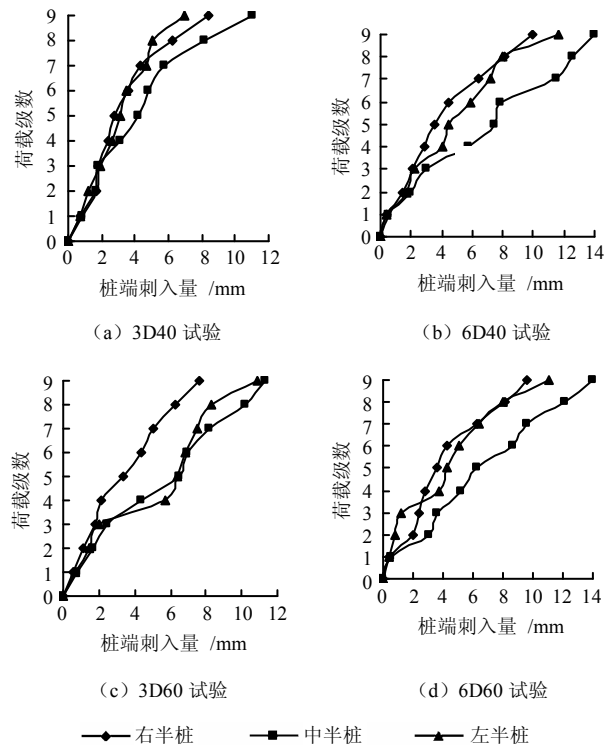


图 10 桩端刺入量对比

Fig.10 Comparison of the relative displacement of pile tip and soil

在本次模型试验当中, 6D 桩距的承台刚度比 3D 桩距承台的小 (二者承台厚度相同), 当受到沿承台中轴分布的均布线荷载作用 (图 2) 时承台发生较大的碟形沉降, 所以其中桩的桩端刺入量要大于两边桩的刺入量, 而刚度相对较大的 3D 桩距承台在相同荷载水平作用下发生的碟形沉降趋势较微弱, 且由于两边桩对桩间土体的遮拦与下曳作用使得中桩刺入量减小, 因此边桩的桩端刺入量与中桩刺入量差异较小, 实际中建筑物本身对基础的沉降均匀的要求是十分严格的, 以上这 2 种情况在基础和整个上部结构中都会产生一些不利的次应力, 只是程度有所不同, 因而控制差异沉降是群桩基础设计中的重要一环。通过对比也进一步说明, 桩距是影响桩端刺入量的主要因素。笔者认为, 由于桩端刺入量是大桩距桩基础主要的沉降构成, 以桩端刺入量为研究对象建立一套大桩距基础新的沉降计算理论, 值得进一步研究。龚晓南^[6]也指出目前计算桩端刺入量的有效办法几乎还没有。此外, 由图 10 还可以看出, 桩长相对于承台较小时因承台效应桩端刺入量会减小, 但相对于桩距而言, 改变桩长对桩端刺入量的影响并不十分明显。

3.6 桩距、桩长对桩土相对位移量的影响

图 11 分别为 4 组试验半桩在加载完毕后的桩土

相对滑移曲线。可以看出，由于承台约束的作用，桩身中上部的相对滑移量较小（在这里需要指出的是，照相拍摄范围的所限，图 11 观测面内包括桩身中上部至桩端范围内的桩-土相对滑移曲线），桩-土相对滑移量沿桩身从上到下逐渐增大。6D 桩型的桩-土相对滑移量大于 3D 桩型，且中桩的相对滑移量大于边桩，这也从另一方面说明了疏桩基础的破坏模式是以刺入破坏为主。相对桩距而言，桩长对桩-土相对滑移量影响甚微。

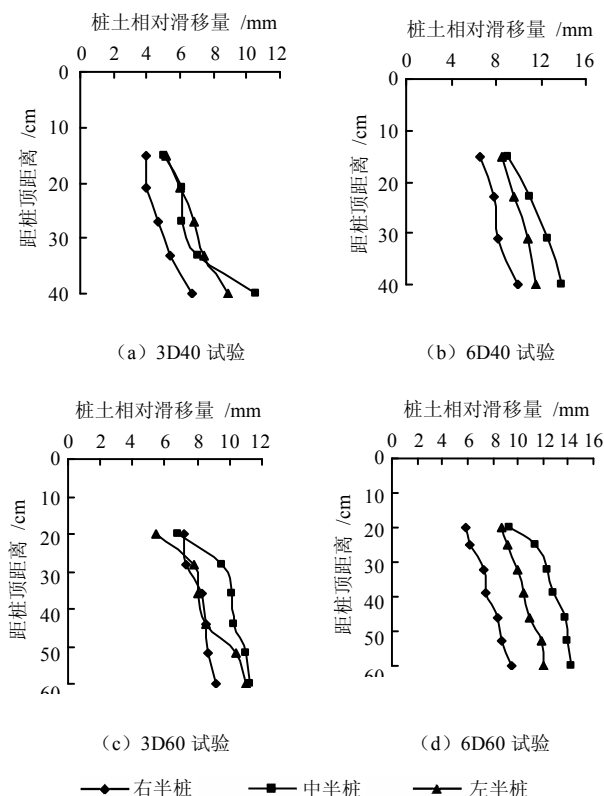


图 11 加载完毕后桩土相对滑移曲线

Fig.11 Interface slip distribution along pile after loading

3.7 桩顶预留净空桩-土相对滑移及桩端刺入量

在桩顶设置 5 mm 净空并以棉花填充模拟刚性桩复合地基的褥垫层，有效调整了桩-土应力分担比并减小差异沉降。在竖向荷载作用下桩顶发生向上的刺入减小了桩端刺入量，并对桩间土进一步压实，增大其整体破坏趋势。比较图 5 (f) 和图 5 (g) 可见，在最后一级荷载下桩端相对于其左、右侧的刺入量见表 2。从表中可以看出，桩顶预留净空的桩端刺入量显著小于前者，这得益于桩间土的压实。在表 2 的基础上列出了刺入量占桩端沉降量的百分比，见表 3，进一步说明了预留净空对桩端刺入量的有效控制。

表 2 6D60 桩顶不设置与设置净空桩端刺入量对比
Table 2 Comparison of the penetration of pile tip for 6D60 piled raft with gap and 6D60 piled raft without gap

位置	桩端刺入量 /mm			
	桩顶不设置预留净空		桩顶设置预留净空	
	桩端左侧	桩端右侧	桩端左侧	桩端右侧
左边桩	13.2	12.6	10.4	7.7
中桩	15.3	14.3	9	9
右边桩	9.6	9.7	3.3	4.6

表 3 6D60 桩顶不设置与设置净空桩端刺入量对比
Table 3 Comparison of the penetration of pile tip for 6D60 piled raft with gap and 6D60 piled raft without gap

位置	桩端刺入量占桩端总沉降量百分比 /%			
	桩顶不设置预留净空		桩顶设置预留净空	
	桩端左侧	桩端右侧	桩端左侧	桩端右侧
左边桩	83.5	79.7	62.2	46.1
中桩	84.1	78.5	49.2	49.2
右边桩	80.0	80.8	32.3	45.1

3.8 降低大桩距的群桩基础差异沉降的方法探讨

如前所述，大桩距（桩间距 $S \geq 6D$ ）的疏桩基础受到竖向荷载作用时，由于承台刚度较小，容易发生碟形沉降，从而导致中桩桩端刺入沉降比边角桩大，而桩间土体并未随桩身发生较大位移。因而除了采取变刚度布桩^[7]等方法来消除基础的不均匀沉降外，似乎还可考虑在边桩桩顶处采用预留适当净空^[8]的方法降低其桩顶反力，同时提高土体的荷载分担，从而调平柔性承台或筏板的碟形沉降使建筑物的沉降尽可能均匀，并起到疏桩基础的良好减沉效果，如图 12 所示。

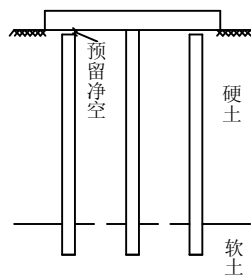


图 12 桩顶预留净空

Fig.12 The gap between the pile top and cap

4 结 论

桩距的变化对受竖向荷载作用的群桩基础的破坏模式以及桩身的受力性状产生极大影响：

(1) 桩距增大使群桩基础的整体破坏趋势减弱，提高了群桩基础的稳定性。当桩距 $S \geq 6D$ 时，群桩基础的沉降及破坏模式由整体沉降、整体破坏变为桩端刺入沉降及刺入破坏。

(2) 桩距是影响桩-土相对滑移量的主要因素。桩距越大, 桩身与土的相对滑移量就越大。在柔性筏基下, 随桩距增加, 中桩的桩-土相对滑移量可能会大于边桩。

(3) 桩顶向上刺入(可通过设置褥垫层、桩顶预留净空或设置可压缩垫块来实现)可有利于桩间土的压密, 减小桩端刺入量, 甚至改变破坏模式。

(4) 由于桩端刺入量是大桩距桩基础中桩沉降主要构成部分, 建立桩端刺入量计算方法值得进一步研究讨论。

参考文献

- [1] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 李元海, 朱合华. 基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 36—41.
LI Yuan-hai, ZHU He-hua. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 36—41.
- [3] 李元海, 朱合华. 基于图像分析的实验模型变形场量测标点法[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1 141—1 145.
LI Yuan-hai, ZHU He-hua. Application of image-based measuring deformation method using target markers in physical model test[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(10): 1 141—1 145.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [5] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社、中国水利水电出版社, 2004.
- [6] 龚晓南. 复合地基发展概况及其在高层建筑中的应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 3—10.
GONG Xiao-nan. Development of composite foundation and its application to highrise building[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(6): 3—10.
- [7] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 151—157.
LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 151—157.
- [8] 郑刚, 高喜峰, 任彦华. 承台(基础)-桩-土不同构造形式下的相互作用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 307—312.
ZHENG Gang, GAO Xi-feng, REN Yan-hua. A study on the interaction of cap (foundation), pile and soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 307—312.
- [11] 袁聚云, 赵锡宏. 竖向线荷载和条形均布荷载作用在地基内部时的土中应力公式[J]. 力学季刊, 1999, 20(2): 156—165.
YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong. Formulas for calculation stresses in soil subjecting to vertical line load and strip distributed load beneath the surface of ground[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 1999, 20(2): 156—165.
- [12] 袁聚云, 赵锡宏. 竖向均布荷载作用在地基内部时的土中应力公式[J]. 力学季刊, 1995, 16(3): 213—222.
YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong. Formulas for the calculation of stresses in soil subjecting to distributed loading beneath the surface of the ground[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 1995, 16(3): 213—222.
- [13] 袁聚云, 赵锡宏. 水平均布荷载作用在地基内部时的土中应力公式[J]. 力学季刊, 1995, 16(4): 339—346.
YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong. Formulas for the computation of stresses in soil subjecting to horizontal distributed loading beneath the surface of the ground[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 1995, 16(4): 339—346.
- [14] POULOS H G, DAVIS E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [15] POULOS H G. Pile behaviour-theory and application[J]. **Geotechnique**, 39(3): 365—415.
- [16] 徐正分. 圆形均布荷载下 Mindlin 应力分布模式及其应用范围的讨论[J]. 勘察科学技术, 1998, (6): 37—39.
XU Zheng-fen. Discussion on the Mindlin stress distribution mode under a circular uniform distributed load and the scope of its application[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 1998, (6): 37—39.
- [17] GEDDES J D. Stress in foundation soils due to vertical subsurface load[J]. **Geotechnique**, 1966, (16): 231—255.
- [18] 宫全美. 基于 Mindlin 位移解的群桩沉降计算[J]. 地下空间, 21(3): 167—177.
GONG Quan-mei. Settlement calculation based on Mindlin displacement solution for pile group[J]. **Underground Space**, 21(3): 167—177.
- [19] 丁继辉, 麻玉鹏, 宇云飞. 基于 Mindlin 应力公式的地基沉降数值计算与分析[J]. 水利水电技术, 2002, 33(5): 8—11.
DING Ji-hui, MA Yu-peng, YU Yun-fei. Numerical calculation and analysis of ground settlement based on Mindlin's stress solution[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2002, 33(5): 8—11.
- [20] 中国建筑科学研究院. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

上接第 2911 页